第 38 卷第 8 期
2018 年 4 月

生　态　学　报
ACTA ECOLOGICA SINICA

Vol.38,No.8
Apr.,2018

DOI: 10.5846/stxb201705160910

赵盼盼,高金涛,郑蔚,贝昭贤,刘志江,熊德成,叶旺敏,曾晓敏,袁萍,杨舟然,陈岳民,杨玉盛.短期增温对中亚热带杉木人工幼林土壤氮磷耦合作用的影响.生态学报,2018,38(8):2829-2837.

Zhao P P, Gao J T, Zheng W, Bei Z X, Liu Z J, Xiong D C, Ye W M, Zeng X M, Yuan P, Yang Z R, Chen Y M, Yang Y S. Influence of short-term warming on the coupling mechanism between soil nitrogen and phosphorus in a young Cunninghamia lanceolata stand in mid-subtropical China. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(8): 2829-2837.

短期增温对中亚热带杉木人工幼林土壤氮磷耦合作用的影响

赵盼盼[1,2],高金涛[1,2],郑　蔚[1,2],贝昭贤[1,2],刘志江[1,2],熊德成[1,2],叶旺敏[1,2],曾晓敏[1,2],袁　萍[1,2],杨舟然[1,2],陈岳民[1,2,*],杨玉盛[1,2]

1 福建师范大学地理科学学院, 福州　350007

2 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福州　350007

摘要:全球变暖引起陆地生态系统和整个生物圈一系列生态问题,未来全球平均气温的持续增加将使这些问题进一步加剧。目前增温、氮沉降和森林更新方式对中亚热带土壤氮磷等养分的影响已有部分研究,但增温对亚热带森林的氮磷耦合作用的影响仍然未知。以中亚热带杉木(*Cunninghamia lanceolate*)幼苗为研究对象,设置埋设电缆以加热土壤增温实验(增温幅度(5±0.5)℃),研究短期增温对土壤含水量、微生物生物量氮(MBN)、微生物生物量磷(MBP)、土壤氮磷养分,以及氮(N)、磷(P)耦合作用的影响。结果表明:短期增温对全氮、全磷无显著影响;增温第 1 年显著提高了有效氮、铵态氮(NH_4^+)和有效磷的含量,显著降低了 MBN 含量。增温第 2 年,土壤中有效磷、NH_4^+ 和 MBP 含量显著下降;短期增温虽然对土壤全 N/P,有效 N/P 的影响不显著,但是增温使铵态氮/硝态亚硝态氮(NH_4^+/(NO_3^-+NO_2^-))显著降低;此外,增温显著降低了 MBN/MBP,缓解了微生物对磷的限制。相关性分析表明,耦合作用不仅受 N 和 P 之间相互作用的影响,也受土壤温度、水分含量等其他因素的影响。研究表明,短期增温并未对中亚热带杉木人工幼林土壤氮磷耦合作用产生显著影响,但增温后降低了有效氮、有效磷的含量。因此,在未来全球变暖背景下,研究结果为中亚热带森林生态系统的的健康发展和科学管理提供重要的理论依据。

关键词:增温;土壤氮;土壤磷;耦合作用;中亚热带

Influence of short-term warming on the coupling mechanism between soil nitrogen and phosphorus in a young Cunninghamia lanceolata stand in mid-subtropical China

ZHAO Panpan[1,2], GAO Jingtao[1,2], ZHENG Wei[1,2], BEI Zhaoxian[1,2], LIU Zhijiang[1,2], XIONG Decheng[1,2], YE Wangmin[1,2], ZENG Xiaomin[1,2], YUAN Ping[1,2], YANG Zhouran[1,2], CHEN Yuehmin[1,2,*], YANG Yusheng[1,2]

1 *School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou* 350007, *China*

2 *Cultivation Base of State Key Laboratory of Humid Subtropical Mountain Ecology, Fuzhou* 350007, *China*

Abstract: Global warming has caused a series of ecological issues in terrestrial ecosystems and the biosphere as a whole; these issues will further aggravate because global average temperatures will continue to increase. Currently, the effects of warming, nitrogen deposition, and forest regeneration on soil nutrients such as N and P have been studied; however, the effects of warming on the coupling between soil N and P in subtropical forests remain unknown. In this study, the influence

基金项目:国家自然科学基金项目(31670620); 海峡联合基金项目(U1505233); "973"计划项目(2014CB954003)

收稿日期:2017-05-16;　　**网络出版日期**:2018-01-08

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: ymchen@fjnu.edu.cn

of short-term warming on the coupling mechanism between soil N and P in Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) seedlings in a mid-subtropical plantation was investigated. In the experiment, cables were buried in the soil to increase soil temperature (temperature range (5±0.5)℃). The effects of short-term warming on soil water content, microbial biomass N (MBN), microbial biomass P (MBP), soil N and P, and N and P coupling were studied. The results showed that the effects of short-term warming on total N and total P were not significant. In the first year, temperature increase led to significant increase in effective N, ammonium N, and available P content, and a significant reduction in MBN content. In the second year, with the increase of temperature, the contents of available P, NH_4^+, and MBP decreased significantly. However, the increase in $NH_4^+/(NO_3^-+NO_2^-)$ content significantly reduced the MBN/MBP content, and alleviated the limitation of P on microorganisms, but the effects of temperature on total N/P and available N/P were not significant. Correlation analysis showed that the coupling effect was not only influenced by the interaction between N and P, but was also influenced by soil temperature, soil water content, and other factors. These results indicated that short-term warming did not significantly affect soil N-P coupling in the subtropical Chinese fir plantation; however, it increased available N and available P contents by promoting plant growth. Thus, our findings will provide an important theoretical basis for sustainable development and scientific management of subtropical forest ecosystems in the context of future global warming.

Key Words: warming; soil nitrogen; soil phosphorus; coupling mechanism; mid-subtropical

全球气候变化包括全球变暖,氮沉降加剧,CO_2等温室气体浓度升高,降水动荡等多个方面,是当前研究的重要课题[1]。以气候变暖为主要特征之一的全球变化正影响着陆地生态系统的结构和功能,威胁着人类的生存与健康,受到世界各国政府和科学家的普遍关注[2-3]。IPCC(2013)根据气候模型预测到 21 世纪末全球地表将平均增温 1.8—4.0℃[4]。温度是影响氮磷矿化最重要的非生物因素之一,土壤温度升高会影响有机物质的分解,氮矿化,以及土壤养分的数量和迁移,从而影响生态系统结构和功能[5-6]。

土壤养分是供给植物生长发育所必需的营养来源元素[7]。N 是生态系统生产力最具限制性的营养因子之一,在生态系统碳氮循环中扮演着重要角色[8];P 是生态系统中重要的组成成分[9]。N 和 P 是限制植物初级生产力的关键元素,植物生长需要大量的 N 和 P[10]。在草原生态系统,当 N 含量比较充足的时候,P 通常成为植物生长的限制因素[11]。N、P 的耦合作用,主要是指土壤中的 N 素和 P 素彼此之间相互作用,以至于相互促进或相互制约的现象。N、P 比值是 N、P 耦合作用的重要指标,其可以指示土壤养分的供需状况。N、P 比值的改变深刻影响土壤中养分的含量和植物生长,物种竞争,群落组成和生态系统功能等[12]。此外,有效 N/P 比值对植物营养限制比较敏感,并且和植物叶片的 N/P 比值密切相关,因此有效 N/P 比值是评价和预测生态系统健康的重要参数[13]。

研究表明土壤温度升高会影响土壤微生物活动,提高土壤酶活性和有效氮的含量,而土壤养分有效性的增加将会提高植物的初级生产力[14]。土壤中有效氮是限制高寒草地植物生长的关键因素之一[15]。许多研究结果表明,增温会增加高寒草地土壤中有效氮,植物对土壤中可利用 N 的吸收也会增加[16-17]。然而在内蒙古温带草原地区增温会降低全氮、全磷和有效氮;但也有研究发现,增温对土壤 N、P 的净矿化速率和植物初级生产力没有明显影响[18-19]。Zhang 等[12]研究表明增温对温带草原的 N/P 无显著影响,对 N、P 耦合作用影响不明显。还有研究表明,增温和干旱使内蒙古温带地区土壤生物地球化学解耦作用发生改变,植物生长受到限制,P 脱离 C 和 N,不再依赖于 C、N 含量,全 N/P 和有效 N/P 比值降低[14]。当前,关于全球变暖对土壤养分的影响大多集中在中高纬地区的草原、农田、苔原和森林生态系统[20-21]。而关于亚热带地区森林土壤 N、P 之间的耦合作用对全球变暖的响应状况鲜见报道。因此,为了进一步了解全球变暖背景下杉木人工幼林土壤养分响应过程和反馈状况,本文的具体探究目标如下:(1) 短期增温对亚热带杉木人工幼林土壤含水量和土壤温度的影响;(2) 短期增温对亚热带杉木人工幼林土壤 N、P 养分及其耦合作用的影响。

1　试验区与试验设计

研究区位于中国福建省三明市,试验地位于福建师范大学大武夷常绿阔叶林野外定位站三明观测点,陈大实验站(26°19′N,117°36′E),位于戴云山东南方向和武夷山西北方向。该地区属亚热带季风气候,年均温度 19.1℃,相对湿度 81%,年均降雨量 1749mm(主要集中在 3—8 月份),年均蒸发量 1585mm[22]。

本试验小区面积 2m×2m,每个小区种植 4 棵杉木幼苗,小区四周用 4 块 PVC 板(200cm×60cm)焊接而成。于 2013 年 10 月在增温和不增温小区均平行布设相同的加热电缆,深度 10cm,间距 20cm。杉木幼苗处在两条电缆线之间。电缆布设完成后 5 个月(2014 年 3 月)开始通电增温,样区详细布设介绍具体参见 Zhang 等[23]。据联 IPCC(2013)第五次气候变化评估报告,到本世纪末,大气温度将升高 0.3—4.8℃[4]。同时也参考了最早进行土壤增温试验的美国哈佛森林的增温幅度设置,所以本研究将增温幅度定为 5℃[20]。其他增温系统设计及增温幅度结果具体参见陈仕东等[24]。

本试验采用完全随机区组设计,以增温为固定因子。设对照(CK)、增温(W)两种处理,每个处理 5 个重复,共 10 个小区。

2　研究方法

2.1　土壤样品采集

2015 年 4 月和 2016 年 4 月(增温满 1 年和两年),在上述每个小区内按照"S"型随机设置 5 个取样点,增温电缆布设在 10cm,用土钻分别取 0—10cm 的土壤,每个小区同一土层土壤混合均匀。将采集的土壤迅速带回实验室,去除可见根系等动植物残体,用于含水率的测定,剩下的土壤过 2mm 筛后分为两部分,一部分用于土壤 C,N 养分的测定;另一部分土壤室温风干研磨后过 0.149mm 筛用于测定土壤全 N,P 等基本理化指标。

2.2　土壤温湿度及土壤养分的测定方法

土壤温度湿度数据采用 CR3000 数据采集器采集(Campbell Scientific, Logan, UT, 美国),所有数据每 5min 扫描记录一次,每 1h 保存一次。土壤全氮含量采用碳氮元素分析仪(Elementar Vario EL III,Elementar,德国)测定;有效氮(NH_4^+ 和 NO_3^-+NO_2^-)用 2mol/L 的 KCl 溶液按 4:1 液土比浸提,用连续流动分析仪(Skalar san++,Skalar,荷兰)测定 NH_4^+ 和 NO_3^-+NO_2^- 含量。全磷采用 $HClO_4$-H_2SO_4 法[25]测定,样品经过消解后,通过 0.45μm 玻璃纤维过滤器(Q/IEF J01-1997,上海),并用连续流动分析仪(Skalar san++,Skalar,荷兰)测定。有效磷由 M3 浸提液[25]提取,用连续流动分析仪(Skalar san++,Skalar,荷兰)测定;MBN 采用熏蒸-硫酸钾浸提法[25],用连续流动分析仪(Skalar san++,Skalar, 荷兰)测定全氮含量。土壤 MBN 计算公式: $B_N = \Delta E_N / k_N$ 。式中:ΔE_N 为熏蒸与未熏蒸土壤有机氮含量的差值;k_N 为转换系数,取值 0.45[25]。土壤 MBP 用 0.5mol/L $NaHCO_3$溶液提取,计算公式为: $B_P = \Delta E_P / k_P$,转换系数 k_P 取值 0.4[25]。

2.3　数据处理

数据经过 Microsoft Excel 2013 软件处理后,采用 SPSS 19.0 软件进行分析,由 Origin 9.0 软件进行绘图。计算 CR3000 观测数据 1 天内的平均值,用折线图表示 2014 年和 2015 年(增温 1 年和两年)土壤含水量和土壤温度的动态变化。用单因素方差分析检验土壤含水量和土壤温度在增温和对照处理下有无显著差异性($P<0.05$)。用单因素和双因素方差分析检验 2015 年和 2016 年土壤养分及其比值有无显著差异性(Duncan 法,$\alpha=0.05$);计算在增温和对照两个处理下土壤温度、土壤含水量与土壤养分其比值的 pearson 相关系数($P<0.05$,$P<0.01$ 和 $P<0.001$)。

3　结果与分析

3.1　增温对土壤理化性质的影响

增温后,土壤中全 C、全 N、pH 均有所下降,但并未达到显著影响(表 1)。增温对全 P 和 C/N 也无影响。

但增温显著降低了土壤含水量($P<0.05$)。

表 1 土壤基本理化性质

Table 1 General characteristics of soil

处理 Treatment	全碳 Total C content/(g/kg)		全氮 Total N content/(g/kg)		全磷 Total P content/(g/kg)		碳氮比 C/N		pH		土壤含水量 Soil water content/%	
	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016
对照 Control (CK)	14.29a	12.80a	1.36a	1.06a	0.26a	0.25a	10.55a	12.08a	4.73a	4.31a	20.42a	22.16a
增温 Warming (W)	12.72a	12.33a	1.21a	1.04a	0.25a	0.28a	10.57a	12.02a	4.60a	4.27a	16.04b	16.71b

不同小写字母表示同一年份不同处理之间差异显著($P<0.05$)

3.2 增温对土壤含水量、土壤温度的影响

土壤含水量和土壤温度呈现一个类似季节性的变化规律,在 6—8 月达到顶峰。增温显著降低了土壤含水量($P<0.05$)。和对照组相比增温幅度基本维持在 5℃左右。增温处理后,2014 年,土壤含水量由 24.07%下降到 19.60%,土壤温度由 23.31℃升高到 28.51℃;2015 年,土壤含水量由 21.86%下降到 17.27%,土壤温度由 22.49℃升高到 26.69℃(图 1)。

3.3 增温对土壤 N、P 及其比值的影响

3.3.1 增温对土壤 N 和 P 的影响

两年的增温处理引起了土壤中全氮、全磷,有效氮、有效磷和 NH_4^+,NO_3^-+NO_2^-,MBN、MBP 的不同变化(图 2)。增温一年后,增温显著增加了有效氮、有效磷含量($P<0.05$),有效氮含量由 8.03mg/kg 增加到 12.45mg/kg,有效磷含量由 1.42mg/kg 增加到 1.90mg/kg。增温一年后 NO_3^-+NO_2^- 也显著增加($P<0.05$)。增温两年后,与对照组相比增温对全氮、全磷、有效氮、有效磷总量并无显著影响;但 NH_4^+ 显著降低($P<0.05$),下降幅度达 26.93%;而 MBN、MBP 也显著降低($P<0.05$)。和增温第 1 年相比,增温第二年有效氮、有效磷含量均有下降的趋势。

整体而言,短期增温对全 N、全 P 无显著影响。但对速效性养分和 MBN,MBP 有显著影响。

3.3.2 增温对 N/P、NH_4^+/(NO_3^-+NO_2^-)、MBN/MBP 的影响

第 1 年和第二年增温都趋向于降低全 N/P 比,但未达到显著水平(图 3),而有效 N/P 也没有发生显著差异,但第一年增温使 NH_4^+/(NO_3^-+NO_2^-)比值显著下降($P<0.05$),由 1.78mg/kg 下降至 0.82mg/kg;此外,增温显著降低了 MBN/MBP($P<0.05$),2015 年平均下降了 46.58%,2016 年平均下降了 48.86%。随着增温时间的持续,增温第二年全 N/P、MBN/MBP 显著低于第 1 年($P<0.05$),而 NH_4^+/(NO_3^-+NO_2^-)呈现相反的趋势($P<0.05$)。

3.4 土壤温度和含水量与土壤养分的相关性

相关分析表明,土壤温度和含水量与 N/P、NH_4^+/(NO_3^-+NO_2^-)、MBN/MBP 比值部分呈一定的相关性。相关系数的范围从-0.970 到 0.856(表 2)。土壤含水量与全 N/P、NH_4^+/(NO_3^-+NO_2^-)和 MBN/MBP 有显著相关性。土壤温度和水分与全 N/P、NH_4^+/(NO_3^-+NO_2^-)和 MBN/MBP 都显著相关。可能是因为增温改变了土壤中酶活性,影响了土壤中微生物的活动过程,从而改变养分的转化。由此可见温度和水分影响了中亚热带杉木人工幼林土壤氮磷耦合作用。

4 讨论

4.1 增温对土壤 N、P 的影响

N、P 均是植物生长所必需的大量营养元素,在植物生长、发育和繁殖等过程中有着重要的作用。自然状态下,很多生态系统生产力都表现为 N 限制或者 P 限制或者 N、P 共同限制[26-27]。本研究发现增温处理对全

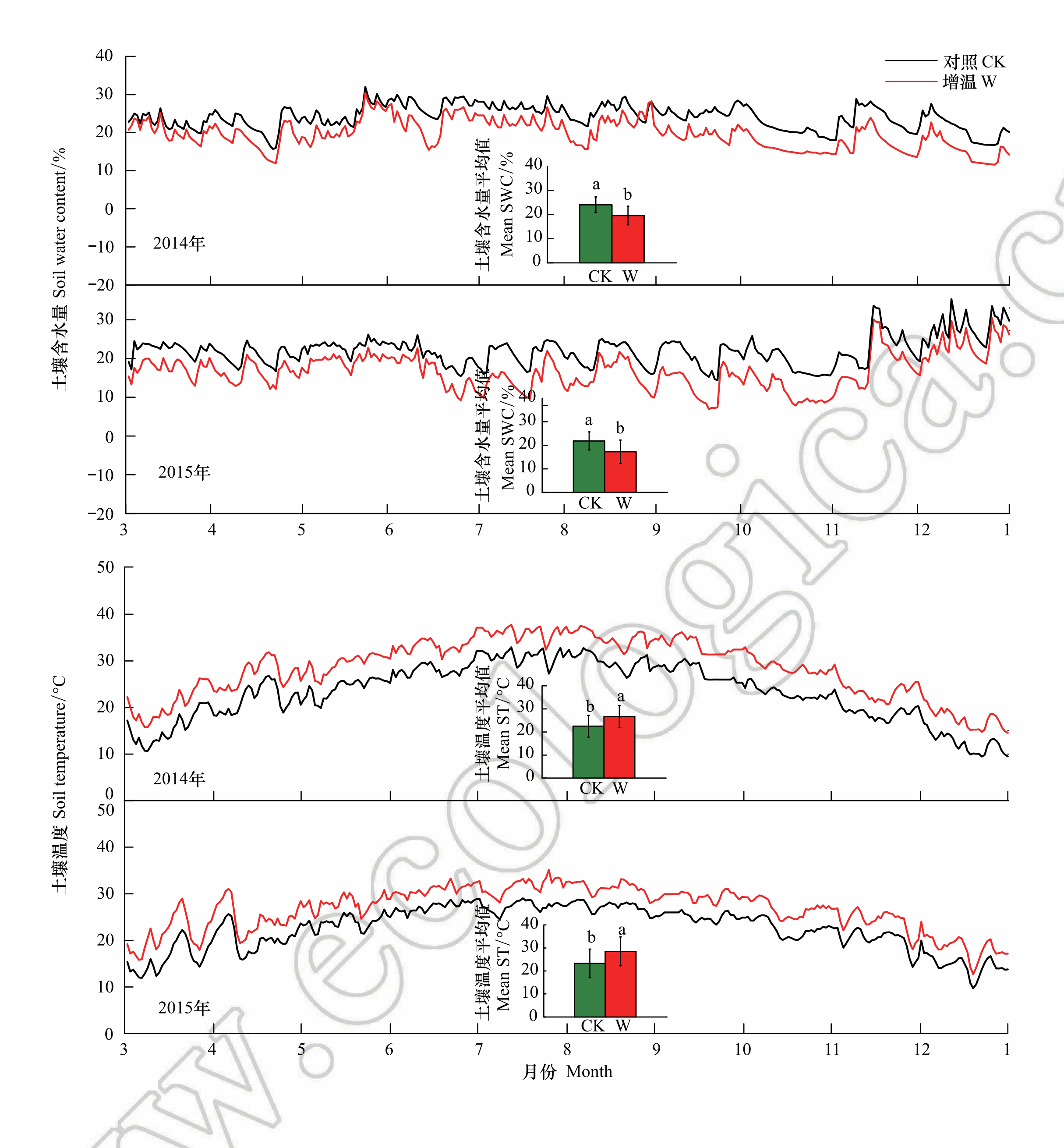


图 1　增温对土壤含水量和土壤温度的影响

Fig.1　Effects of warming on soil water content and soil temperature

CK:对照 Control;W:增温 Warming;不同小写字母表示不同处理之间差异显著(P<0.05)

N、P 均无显著影响;增温一年后,相对于对照,有效氮和 NO_3^-+NO_2^- 含量显著提高,即短期增温增强了有机氮矿化,Zhang 等[12]在温带松嫩草原地区也得出一致的研究结论。Melillo 等[28]在温带森林进行的长期增温实验表明,温度上升能显著提高土壤有机氮矿化速率和净硝化速率[29-30],从而为植物的生长提供更多的无机氮[29],即土壤增温可以使氮的有效性增加[21]。增温 1 年后土壤 NO_3^-+NO_2^- 含量显著高于对照。原因可能有两个:其一多数研究认为 NO_3^-+NO_2^- 易随降水而淋溶[31],2015 年 4 月份降雨较少,增温之后土壤含水率显著降低(P<0.05),淋溶减弱导致土壤中 NO_3^-+NO_2^- 含量显著提高[32]。另外,刘志江等[33]前期在本样地的研究发现土壤中氧气随着土壤含水量的降低而增加,相对有氧的环境将抑制土壤反硝化过程,也可能使 NO_3^-+NO_2^- 显著增加。相比对照,增温一年显著提高了有效磷含量,Gao 等[34]在本样地的前期研究表明,增温显著提高

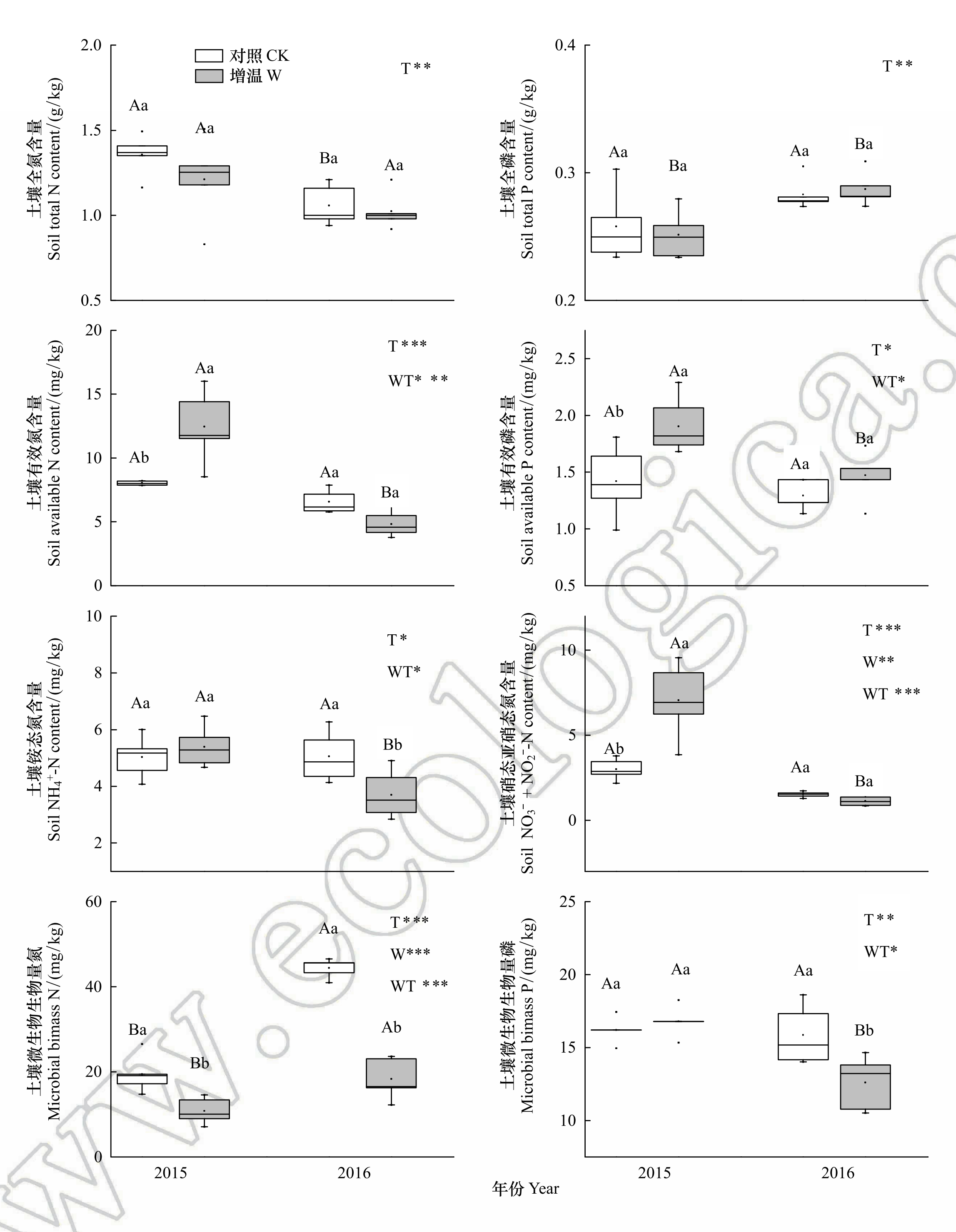


图 2　增温对土壤养分的影响

Fig.2　Effects of warming on soil nutrients

T:时间效应 Time effect;WT:增温和时间交互作用 Interaction effect of warming and time;不同小写字母表示同一年份不同处理之间差异显著(P<0.05),不同大写字母表示不同年份同一处理之间差异显著(P<0.05);图中数据为平均值±标准差(n=5);*, ** 和 *** 分别代表 P<0.05, P <0.01 和 P<0.001

了土壤中酸性磷酸酶的活性,即更多的有机磷矿化为无机磷,从而使有效磷含量显著上升。

增温第二年,土壤有效氮,NH_4^+,NO_3^-+NO_2^- 均略有降低但与对照相比未达到显著差异。本样地前期研究证明 2016 年 3—8 月增温之后改变了杉木生长节律,地径总生长量和地径日均生长量较对照均表现出增加趋势[35],有研究表明植物吸收利用的大部分的有效氮是通过微生物的矿化作用,将有机氮转化为无机氮[30],因

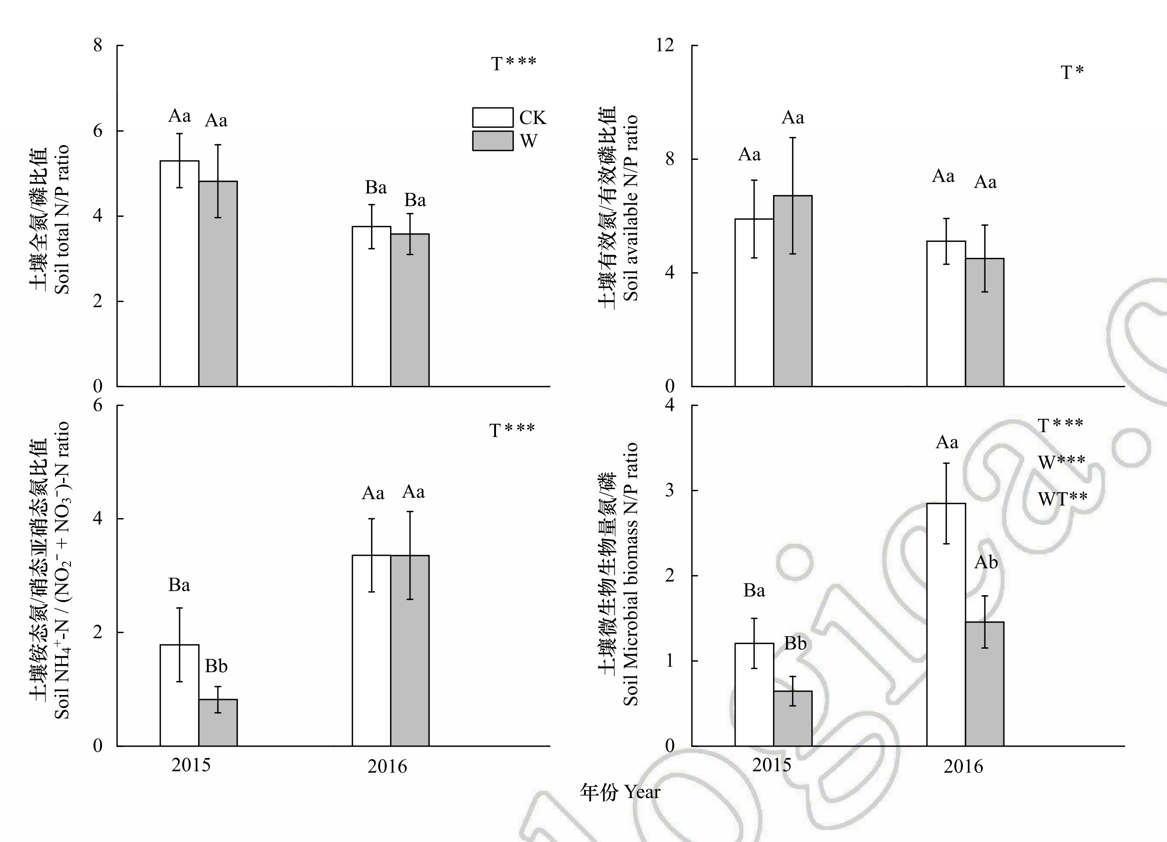


图 3　增温处理后土壤养分 N/P 和 NH_4^+-N/(NO_3^-+NO_2^-)-N 和 MBN/MNP 比的影响

Fig.3　Effects of warming on soil N/P and NH_4^+/(NO_3^-+NO_2^-) MBN/MBP ratios

此土壤无机氮被杉木快速生长吸收利用,从而使其含量显著下降。增温第二年后,土壤有效磷减少,但还未达显著差异,可能的原因是增温第二年杉木幼苗生长量增加[35],从而带走了土壤中更多的有效磷。

表 2　不同处理下土壤温度和土壤含水量与土壤养分的相关性

Table 2　Relationships between soil nutrient and soil temperature as well as soil water content in different treatment

土壤养分 Soil nutrient	土壤含水量 Soil water content		土壤温度 Soil temperature	
	对照 CK	增温 W	对照 CK	增温 W
全氮 Total N	−0.691*	−0.019	0.812**	0.413
全磷 Total P	0.625	0.427	−0.544	−0.805**
全氮/磷 Total N/P ratio	−0.669*	−0.194	0.636*	0.673*
有效氮 Available N	−0.673*	−0.037	0.780**	0.841**
有效磷 Available P	−0.433	−0.095	0.277	0.667*
有效氮/磷 Available N/ P ratio	−0.171	−0.028	0.365	0.632
铵态氮 NH_4^+-N	0.092	0.091	−0.014	0.718*
硝态氮 (NO_3^-+NO_2^-)-N	−0.824**	0.018	0.874**	0.856**
铵态氮/硝态氮 NH_4^+-N/(NO_3^-+NO_2^-)-N ratio	0.739*	0.248	−0.807**	−0.897**
微生物生物量氮 MBN	0.803**	0.174	−0.970**	−0.722*
微生物生物量磷 MBP	−0.037	−0.524	0.121	0.827**
微生物生物量氮/磷 MBN/MBP	0.717*	0.369	−0.920**	−0.867**

皮尔森相关系数(R)及其意义(*P*)分别为: *, ** 和 *** 分别代表 $P<0.05$, $P<0.01$ 和 $P<0.001$

和增温第 1 年相比,增温第二年全氮、有效氮、有效磷、NH_4^+、NO_3^-+NO_2^- 含量都呈现下降趋势,其中全氮、有效氮、有效磷显著下降(图 2),可能的主要原因是第 1 年杉木要适应一个新的环境,生长速度较慢,因此土壤养分消耗的较慢;也可能是因为和增温第 1 年相比,第二年土壤中微生物更加适应了增温环境,消耗了更多

的养分。

增温处理 1 年和两年后，MBN 和 MBP 都显著降低（$P<0.05$），可能的主要原因是土壤，植物体和微生物的 N、P 元素总值基本保持不变，增温促进杉木幼苗的生长，杉木地上地下生物量的增加带走较多的 NO_3^-+NO_2^-、NH_4^+、有效磷、而使土壤缺磷更加突出，微生物可固定的 N、P 素减少，从而使得 MBN、MBP 含量下降。

4.2 增温对土壤 N、P 耦合作用的响应

增温虽然对全 N/P，有效 N/P 比值影响不显著，但是内在组成是有变化的，增温第 1 年显著增加了 NO_3^-+NO_2^-，使 NH_4^+/（NO_3^-+NO_2^-）显著降低。增温第二年 NO_3^-+NO_2^-，NH_4^+ 含量也下降，但它们比值变化未达显著水平。Zhang 等[12] 在温带松嫩草原地区和 Geng 等[36] 在温带内蒙古草原也得出了一致的研究结论，增温对氮磷耦合作用无显著影响，他们研究均表明增温趋向于增加有效 N/P，但对全 N/P 几乎无影响。然而与 Jiao 等[14] 在温带内蒙古草原研究结果不同，增温增加了 N、P 耦合作用，全 N/P、有效 N/P 显著下降，这是因为不同海拔地区，温度不一定是控制氮矿化的主要因素，如在干旱半干旱草原，增温加剧了干旱程度，土壤水分含量减少，植被覆盖下降，更容易造成水土流失和养分流失[37]。且与在青藏高寒地区研究结果也不同，增温显著增加了有效 N/P，全 N/P 无显著变化，可能的原因是寒冷的天气抑制微生物的活动，增温后氮矿化速率显著增加，有效 N/P 显著增加[36]。此外增温显著降低了 MBN/MBP，缓解了微生物对 P 的限制。

耦合作用不仅受 N 和 P 之间的相互作用的影响，也受到土壤温度、水分含量、土壤 pH 等其他因素影响[12]。土壤含水量通过影响有机物分解速率和氧化还原电位从而影响土壤和土壤溶液中离子含量[38]。水和温度是生物地球化学过程的重要因素，干燥和温暖的气候将大大改变生物量的积累，以不同的方式分解和存储，可能破坏 C、N 和 P 的生物地球化学循环，消极影响了这些生态系统提供的关键服务[14]。但是 Zhang 等人研究发现松嫩草原土壤温度和土壤含水量与 N、P 元素呈显著相关[12]，其与本研究结论不一致的原因可能是气候带不同，植被类型不同，增温后微生物活性也有一定的差别。Jiao 等[14] 研究表明土壤 pH 主要受气候的长期影响，土壤的 pH 值对土壤 N/P 比值存在潜在影响。此外 N/P 比值也受研究地区生态系统和植被类型的影响[15]。

5 结论

短期增温是影响中亚热带杉木人工幼林土壤和微生物 N、P 循环过程的重要因素，增温第一年显著增加了有效氮含量，增强有机氮的矿化过程，此外，增温使土壤含水量显著下降，淋溶减弱使土壤中 NO_3^-+NO_2^- 含量显著提高。增温第二年，随着增温时间的持续增加，可能和杉木生长加快有关，带走了土壤中更多的有效氮、有效磷，使有效磷，NH_4^+ 含量显著下降，造成 MBN，MBP 下降。增温显著降低了 MBN/MBP 比值，缓解了微生物对磷的限制。短期增温虽然对中亚热带森林 N、P 耦合作用无显著影响，但增温降低了有效氮、有效磷。长期增温对 N、P 耦合作用有待深入研究。

参考文献（References）：

[1] 张乃莉，郭继勋，王晓宇，马克平. 土壤微生物对气候变暖和大气 N 沉降的响应. 植物生态学报，2007，31(2)：252-261.

[2] Oreskes N. The scientific consensus on climate change. Science，2004，306(5702)：1686.

[3] Eklöf J S，Alsterberg C，Havenhand J N，Sundbäck K，Wood H L，Gamfeldt L. Experimental climate change weakens the insurance effect of biodiversity. Ecology Letters，2012，15(8)：864-872.

[4] IPCC，2013. Climate Change 2013：The Physical Science Basis. Working Group I：Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change Fifth Assessment Report. Cambridge University Press，Cambridge，UK.

[5] Agren G I，Mcmurtrie R E，Parton W J，Pastor J，Shugart H H. State-of-the-art of models of production-decomposition linkages in conifer and grassland ecosystems. Ecological Applications，1991，1(2)：118-138.

[6] Coughenour M B，Chen D X. Assessment of grassland ecosystem responses to atmospheric change using linked plant-soil process models. Ecological Applications，1997，7(3)：802-827.

[7] 张福锁，樊小林，李晓林. 土壤与植物营养研究新动态. 北京：中国农业出版社，1995.

[8] Gruber N，Galloway J N. An Earth-system perspective of the global nitrogen cycle. Nature，2008，451(7176)：293-296.

[9] Katsalirou E，Deng S P，Gerakis A，Nofziger D L. Long-term management effects on soil P，microbial biomass P，and phosphatase activities in

prairie soils. European Journal of Soil Biology, 2016, 76: 61-69.

[10] Mo Q F, Zou B, Li Y W, Chen Y, Zhang W X, Mao R, Ding Y Z, Wang J, Lu X K, Li X B, Tang J W, Li Z A, Wang F M. Response of plant nutrient stoichiometry to fertilization varied with plant tissues in a tropical forest. Scientific Reports, 2015, 5: 14605.

[11] Jouany C, Cruz P, Daufresne T, Duru M. Biological phosphorus cycling in grasslands: interactions with nitrogen//Bünemann E, Oberson A, Frossard E, eds. Phosphorus in Action. Berlin Heidelberg: Springer, 2011: 275-294.

[12] Zhang N Y, Guo R, Song P, Guo J X, Gao Y Z. Effects of warming and nitrogen deposition on the coupling mechanism between soil nitrogen and phosphorus in Songnen Meadow Steppe, northeastern China. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 65: 96-104.

[13] Schipper L A, Percival H J, Sparling G P. An approach for estimating when soils will reach maximum nitrogen storage. Soil Use and Management, 2004, 20(3): 281-286.

[14] Jiao F, Shi X R, Han F P, Yuan Z Y. Increasing aridity, temperature and soil pH induce soil C-N-P imbalance in grasslands. Scientific Reports, 2016, 6: 19601.

[15] Parton W J, Ojima D S, Schimel D S. Environmental change in grasslands: assessment using models. Climate Change, 1994, 28(1/2): 111-141.

[16] Grogan P, Chapin F S III. Initial effects of experimental warming on above- and belowground components of net ecosystem CO_2 exchange in arctic tundra. Oecologia, 2000, 125(4): 512-520.

[17] Michelsen A, Jonasson S, Sleep D, Havström M, Callaghan T V. Shoot biomass, $\delta^{13}C$, nitrogen and chlorophyll responses of two arctic dwarf shrubs to in situ shading, nutrient application and warming simulating climatic change. Oecologia, 1996, 105(1): 1-12.

[18] Rinnan R, Michelsen A, Bååth E, Jonasson S. Mineralization and carbon turnover in subarctic heath soil as affected by warming and additional litter. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39(12): 3014-3023.

[19] Menge D N L, Field C B. Simulated global changes alter phosphorus demand in annual grassland. Global Change Biology, 2007, 13(12): 2582-2591.

[20] Melillo J M, Steudler P A, Aber J D, Newkirk K, Lux H, Bowles F P, Catricala C, Magill A, Ahrens T, Morrisseau S. Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system. Science, 2002, 298(5601): 2173-2176.

[21] Li C, von Storch J S, Marotzke J. Deep-ocean heat uptake and equilibrium climate response. Climate Dynamics, 2013, 40(5/6): 1071-1086.

[22] Guo J F, Yang Z J, Lin C F, Liu X F, Chen G S, Yang Y S. Conversion of a natural evergreen broadleaved forest into coniferous plantations in a subtropical area: effects on composition of soil microbial communities and soil respiration. Biology and Fertility of Soils, 2016, 52(6): 799-809.

[23] Zhang Q F, Xie J S, Lyu M, Xiong D C, Wang J, Chen Y, Li Y Q, Wang M K, Yang Y S. Short-term effects of soil warming and nitrogen addition on the N:P stoichiometry of *Cunninghamia lanceolata* in subtropical regions. Plant and Soil, 2017, 411(1/2): 395-407.

[24] 陈仕东, 刘小飞, 熊德成, 林伟盛, 林成芳, 谢麟, 杨玉盛. 持续性主动增温对中亚热带森林土壤呼吸影响研究初报. 亚热带资源与环境学报, 2013, 8(4): 1-8.

[25] Carter M R, Gregorich E G. Soil Sampling and Methods of Analysis. Florida: The Chemical Rubber Company Press, 1993, 637-644.

[26] Elser J J, Bracken M E S, Cleland E E, Gruner D S, Harpole W S, Hillebrand H, Ngai J T, Seabloom E W, Shurin J B, Smith J E. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems. Ecology Letters, 2007, 10(12): 1135-1142.

[27] Vitousek P M, Porder S, Houlton B Z, Chadwick O A, Townsend A R. Terrestrial phosphorus limitation: mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions. Ecological Applications, 2010, 20(1): 5-15.

[28] Melillo J M, Butler S, Johnson J, Mohan J, Steudler P, Lux H, Burrows E, Bowles F, Smith R, Scott L, Vario C, Hill T, Burton A, Zhou Y M, Tang J. Soil warming, carbon-nitrogen interactions, and forest carbon budgets. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, 108(23): 9508-9512.

[29] Kaye J P, Binkley D, Rhoades C. Stable soil nitrogen accumulation and flexible organic matter stoichiometry during primary floodplain succession. Biogeochemistry, 2003, 63(1): 1-22.

[30] 高建梅, 董丽媛, 胡古, 沙丽清. 哀牢山中山湿性常绿阔叶林土壤氮转化的海拔效应. 生态学杂志, 2011, 30(10): 2149-2154.

[31] Zhou X Q, Chen C G, Wang Y F, Xu Z H, Han H Y, Li L H, Wan S Q. Warming and increased precipitation have differential effects on soil extracellular enzyme activities in a temperate grassland. Science of the Total Environment, 2013, 444: 552-558.

[32] 陈岳民, 高金涛, 熊德成, 袁萍, 曾晓敏, 谢锦升, 杨玉盛. 土壤增温对中亚热带杉木幼林土壤微生物群落结构和有效氮的影响. 亚热带资源与环境学报, 2016, 11(4): 1-8.

[33] 刘志江, 林伟盛, 杨舟然, 林廷武, 刘小飞, 陈岳民, 杨玉盛. 模拟增温和氮沉降对中亚热带杉木幼林土壤有效氮的影响. 生态学报, 2017, 37(1): 44-53.

[34] Gao J T, Wang E X, Ren W L, Liu X F, Chen Y, Shi Y W, Yang Y S. Effects of simulated climate change on soil microbial biomass and enzyme activities in young Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) in subtropical China. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(4): 272-278.

[35] 叶旺敏, 熊德成, 刘小飞, 林伟盛, 胥超, 杨智杰, 杨玉盛. 增温对杉木幼树生长特征的影响研究初报. 亚热带资源与环境学报, 2016, 11(4): 89-92.

[36] Geng Y, Baumann F, Song C, Zhang M, Shi Y, Kühn P, Scholten T, He J S. Increasing temperature reduces the coupling between available nitrogen and phosphorus in soils of Chinese grasslands. Scientific Reports, 2017, 7: 43524.

[37] Reynolds J F, Smith D M S, Lambin E F, Turner II B L, Mortimore M, Batterbury S P J, Downing T E, Dowlatabadi H, Fernández R J, Herrick J E, Huber-Sannwald E, Jiang H, Leemans R, Lynam T, Maestre F T, Ayarza M, Walker B. Global desertification: building a science for dryland development. Science, 2007, 316(5826): 847-851.

[38] Swift M, Heal O W, Anderson J M. Decomposition in terrestrial ecosystems. Applied Physics Letters, 1979, 83(14): 2772-2774.